

М.В. Шмакова, С.А. Кондратьев

**АНАЛИЗ И РАСЧЕТЫ ТВЕРДОГО СТОКА
(НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРОАМЕРИКАНСКИХ РЕК)**

M.V. Shmakova, S.A. Kondratyev

**ANALYSIS AND CALCULATIONS OF SEDIMENT DISCHARGE
(FOR NORTH AMERICAN RIVERS)**

Представлены результаты анализа данных натурных наблюдений за расходами влекомых и взвешенных наносов на некоторых водотоках США. Выполнен расчет общего расхода наносов с использованием различных известных формул. Сопоставление наблюдаемых и рассчитанных расходов наносов показало, что наилучшее совпадение дает аналитическая формула расхода наносов.

Ключевые слова: общий расход наносов, влекомые и взвешенные наносы, сопротивление трения, аналитическая формула расхода наносов.

The results of the analysis of field study for suspended and bed sediment discharges in selected US rivers are presented. Total sediment discharge calculation using various well-known formulas is submitted. Comparison of the observed and calculated sediment discharge has shown that the best agreement gives the analytical formula of sediment discharge.

Key words: total sediment discharge, suspended and bed sediment, frictional resistance, analytical formula of sediment discharge.

Общие положения

Настоящая работа посвящена анализу твердого стока рек, расположенных в различных физико-географических зонах, на примере нескольких хорошо изученных североамериканских водотоков. Решаются следующие задачи:

1. Оценка вклада расхода влекомых наносов в общий расход наносов для различных периодов водности.
2. Сравнительный анализ формул общего расхода наносов.
3. Анализ зависимости параметра сопротивления трения от водности в формулах общего расхода наносов.

Основной проблемой при анализе различных характеристик твердого стока рек является недостаточность данных натурных наблюдений и их плохое качество. В отечественных литературных источниках представлены лишь относительно непродолжительные ряды наблюдений на реках СССР и РФ. Поэтому данные одновременных измерений гидравлических переменных состояния потока и расхода влекомых и взвешенных наносов в разные периоды водности за несколько лет, опубликованных в отчете Геологической службы США [16], являются уникальным материалом для выполнения тематических расчетов и последующего анализа результатов. Наблюдения на этих водотоках проводились в 70–80-х гг. прошлого столетия. Здесь представлены

данные о взвешенных и влекомых наносах, измеряемых практически одновременно. Кроме того, в отчете приводятся гидравлические переменные состояния, а также гранулометрический анализ донных отложений и наносов. Наиболее полные данные, необходимые для выполнения поставленных задач, представлены для пятнадцати гидрометрических створов, расположенных на реках штатов Аляска, Айдахо, Колорадо, Вашингтон и Висконсин. Для оценки вклада расхода влекомых наносов в общий расход наносов использовались данные 13 гидрометрических створов.

Анализ вклада расхода влекомых наносов в общий расход наносов в разные периоды водности

Актуальность оценки вклада расходов взвешенных и влекомых наносов в общий сток наносов или соотношения между расходами взвешенных и влекомых наносов определяется прежде всего при решении задач заиления водохранилищ, русловых карьеров и траншей речными наносами, а также при планировании различных гидротехнических мероприятий на реках.

Вопрос оценки соотношения расходов взвешенных и влекомых наносов неоднократно поднимался в научной литературе [7, с. 29], однако и по настоящее время по-прежнему недостаточно изучен. Основными причинами этого являются, безусловно, недостаточная точность измерения расхода влекомых наносов, отсутствие физически обоснованной концепции транспорта наносов [7, с. 23] и, как следствие, низкая точность расчетных формул расхода наносов.

Приведенные в отчете [16] материалы наблюдений за расходами взвешенных и влекомых наносов дают возможность оценить доли вклада расхода влекомых наносов в общий расход наносов для некоторых водотоков США и проанализировать полученные результаты совместно с такими гидравлическими характеристиками речных потоков, как уклон и средний для каждой водности расход воды.

В табл. 1 приведены рассчитанные значения вклада расхода влекомых наносов в общий расход наносов $G_{вл}/G_{общ}$ для расчетных водотоков в разные фазы водности, а на рис. 1 и 2 представлены зависимости вклада от уклона I и среднего расхода воды Q для разных по водности периодов.

Доля влекомых наносов в общем количестве перемещаемого твердого вещества для исследуемых рек изменяется в достаточно больших пределах — от нескольких единиц до нескольких десятков процентов. Наибольшие значения отношения $G_{вл}/G_{общ}$ — от 36 до 75 % — приходятся на водотоки водосборов штата Висконсин, характеризующиеся интенсивной водохозяйственной деятельностью.

Как видно на рис. 1, для всех водотоков, за исключением рек штата Висконсин, имеет место линейная зависимость отношения $G_{вл}/G_{общ}$ от уклона для периодов большой и средней водности. Отсутствие зависимости для меженного периода можно объяснить пониженной точностью измерения расхода влекомых наносов, а отсутствие связи отношения $G_{вл}/G_{общ}$ и уклона для рек штата Висконсин объясняется их большой зарегулированностью. Прямая зависимость отношения $G_{вл}/G_{общ}$ от уклона обусловлена увеличением влекущей силы потока с увеличением наклона русла и, как следствие, вовлечение в движение большего количества твердого материала.

Таблица 1

Значения вклада расхода влекомых наносов в общий расход наносов для расчетных водотоков в разные фазы водности

Гидрометрический створ	$G_{вл}/G_{общ}$			$Q, \text{ м}^3/\text{с}$			$I, \text{ б/р}$
	Водность			Водность			
	ср.	мин.	макс.	ср.	мин.	макс.	
Susitna River near Talkeetna, Alaska	0,02	0,05	0,02	668	282	1095	0,00146
Talkeetna River near Talkeetna, Alaska	0,15	0,25	0,11	253	89,60	445	0,00096
Chulitua River below Canyon near Talkeetna, Alaska	0,15	0,33	0,05	563	294	980	0,00131
Susitna River at Sunshine, Alaska	0,04	0,14	0,03	1333	702	2006	0,0024
Tanana River at Fairbanks, Alaska	0,02	0,03	0,01	1092	495	1719	0,000467
Snake River near Anatone, Washington	0,13	0,04	0,05	2017	1117	2887	0,001033
Toutle River at Tower Road near Silver Lake, Washington	0,16	0,13	0,07	73,89	21,47	231,20	0,00311
Clearwater River at Spalding, Idaho	0,07	0,15	0,04	1186	506	1908	0,000312
North Fork of Big Lost River at Wild Horse (near Chilly), Idaho	0,29	0,27	0,09	13,14	5,91	22,40	0,00666
South Fork of Salmon River near Cascade, Idaho	0,32	0,07	0,31	43,90	5,37	129,75	0,00695
Yampa River at Deerlodge Park, Colorado	0,08	0,12	0,02	210	37,88	416	0,000673
Wisconsin River at Muscoda, Wisconsin	0,59	0,56	0,40	269	123	977	0,000311
Chippewa River at Durand, Wisconsin	0,43	0,75	0,36	261	64,65	742	0,000326

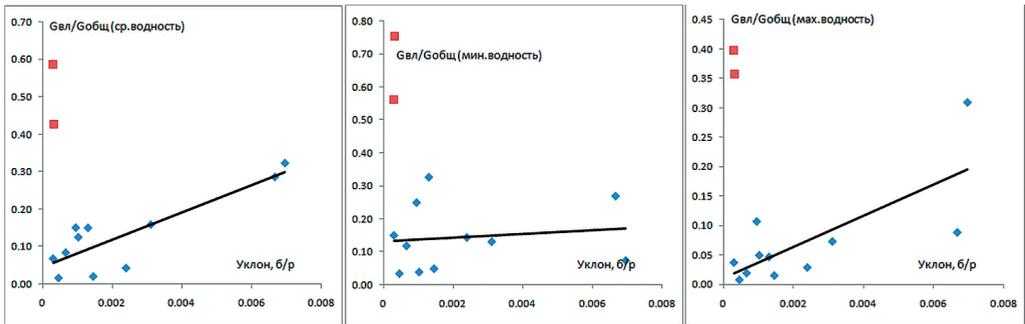


Рис. 1. Зависимость отношения $G_{вл}/G_{общ}$ от уклона

Зависимость отношения $G_{вл}/G_{общ}$ от расхода проявляется слабо, в виде гиперболы одинаково для всех периодов водности (рис. 2). Из этого графика следует, что вклад влекомых наносов в общий сток наносов уменьшается для больших рек.

На рис. 3 приведены примеры зависимостей вклада расхода влекомых наносов в общий расход наносов от водности реки. Почти для всех водотоков с увеличением водности доля влекомых наносов уменьшается. Это не противоречит общим представлениям о генезисе и транспорте речных наносов — «при малых расходах воды при уменьшении мутности относительное количество влекомых наносов в большинстве случаев будет возрастать» [6, с. 208].

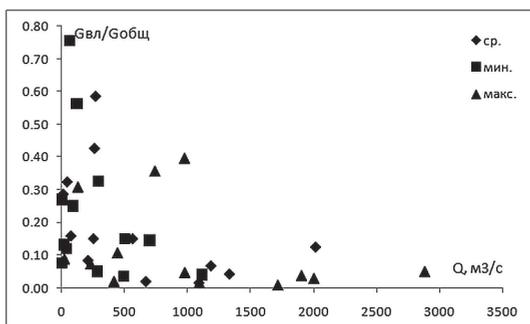


Рис. 2. Зависимость отношения $G_{вл}/G_{общ}$ от среднего для каждого периода водности расхода воды

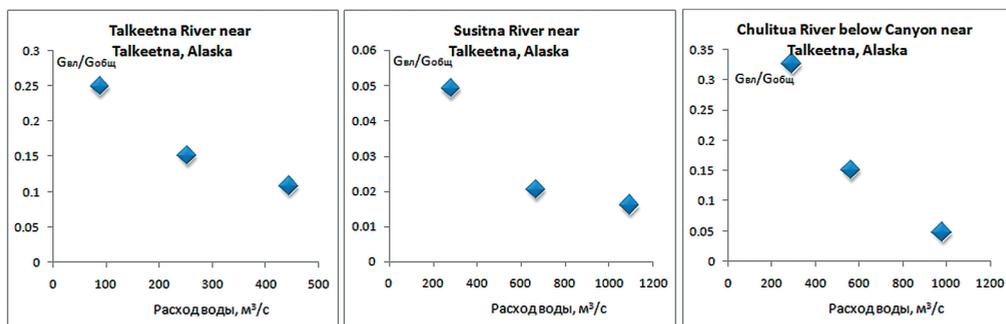


Рис. 3. Зависимость вклада расхода влекомых наносов в общий расход наносов от водности реки

Хорошую связь показали средние для каждой водности расходы взвешенных наносов $G_{взв}$ со средними для каждой водности расходами воды. Однако для расхода влекомых наносов $G_{вл}$ такая связь имеет место не для всех водотоков. Примеры таких зависимостей приведены на рис. 4.

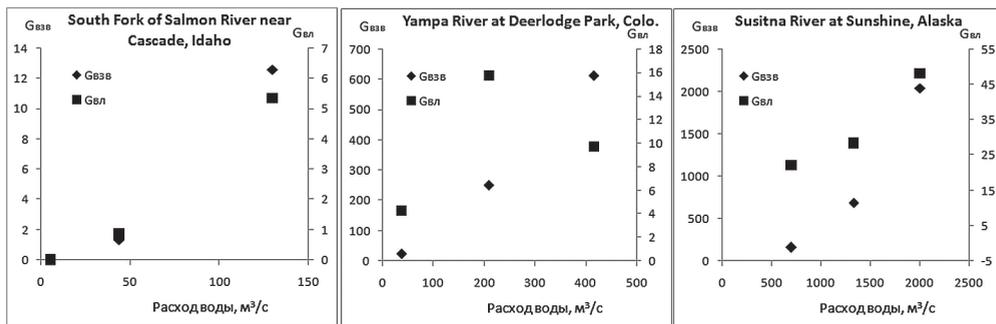


Рис. 4. Связь расхода влекомых $G_{вл}$ и взвешенных $G_{взв}$ наносов, кг/с, от среднего для каждой водности расхода воды

На рис. 5 приведены зависимости соотношения $G_{\text{вл}}/G_{\text{общ}}$ для всех периодов водности от диаметра донных отложений d обеспеченностью 30 и 50 %. Так же, как и в случае с расходом воды (рис. 2), зависимость гиперболического типа относительно слабая. Из графика на рис. 5 вполне ожидаемо следует, что вклад влекомых наносов в общий сток наносов уменьшается с увеличением диаметра донных отложений. Отношение $G_{\text{вл}}/G_{\text{общ}}$ и средний диаметр отдельно взвешенных и влекомых наносов оказались не связанными между собой, и соответствующие графики в данной работе не приводятся.

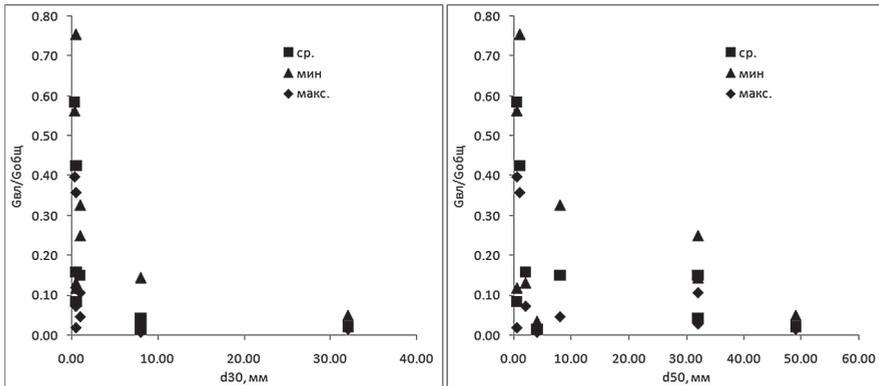


Рис. 5. Зависимость отношения $G_{\text{вл}}/G_{\text{общ}}$ от диаметра донных отложений

Таким образом, выявленные изменения значений отношения $G_{\text{вл}}/G_{\text{общ}}$ в зависимости от фазы водности водотока, полученные в результате вычислений, в целом соответствуют общим представлениям о природе процесса. Очевидно, что значение вклада расхода влекомых наносов в общий расход наносов для отдельного водотока не является постоянным и определяется характером водохозяйственной деятельности на водосборе и русле реки.

Сравнительный анализ формул общего расхода наносов

Общий расход наносов является функцией гидравлических характеристик потока — средней скорости потока, глубины, расхода воды, уклона, размера, гидравлической крупности и плотности частиц, а также касательного напряжения на твердой границе потока. Рассмотренные в настоящей работе и приведенные ниже формулы получены на основе анализа размерностей и исходя из гравитационной теории транспорта наносов. И только аналитическая формула расхода наносов является следствием уравнения движения двухфазного речного потока, взаимодействие дна и потока в котором представлено силой сопротивления грунта сдвигу.

Формула Янга (Yang S.Q.) и Лима (Lim S.Y.) получена с помощью анализа размерности для рек с песчаным дном [15, с. 68]. Общий расход наносов G (кг/с) связывается с касательным напряжением на дне τ [кг/(м·с²)], сдвигающей скоростью $u^{*'} (м/с)$, критической сдвигающей скоростью $u_{cr}^{*'} (м/с)$ и гидравлической крупностью $w (м/с)$:

$$G = Bk \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} \tau \frac{u^{*2} - u_{cr}^*}{w}, \quad (1)$$

где B — ширина потока, м; k — коэффициент пропорциональности, равный 12,5; $\rho_{\text{воды}}$ и $\rho_{\text{грунта}}$ — плотности воды и грунта, кг/м³.

Формула Эккерса (*Ackers P.*) и Уайта (*White W.R.*) также получена в результате анализа размерности [9, с. 53]. Транспорт мелкодисперсного материала связан со сдвигающей скоростью потока, а транспорт более крупных частиц сопряжен со средней скоростью потока. Однако большое количество неопределенных параметров в формуле затрудняет расчеты. Общая концентрация наносов в потоке C_t записывается как

$$C_t = m_3 \left(\frac{F_{gr} - F_{gr.cr.}}{F_{gr}} \right)^{m_2} \left(\frac{v}{u^*} \right)^{m_1} \frac{d_{35} \rho_{\text{грунта}} / \rho_{\text{воды}}}{h},$$

$$F_{gr} = \frac{u^{*m_1}}{\sqrt{gd_{35}(\rho_{\text{грунта}} / \rho_{\text{воды}} - 1)}} \left[\frac{v}{\sqrt{32 \log \frac{ah}{d_{35}}}} \right]^{1-m_1}, \quad (2)$$

где h — средняя глубина потока, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; d_{35} — размер частиц обеспеченностью 35 %, м; v — средняя скорость потока, м/с; u^* — динамическая скорость, м/с; a — коэффициент; $F_{gr.cr.}$ — значение параметра текучести F_{gr} в начале движения; m_1, m_2, m_3 — параметры, определяемые размерами частицы d .

Формула Карима (*Karim M.F.*) и Кеннеди (*Kennedy J.F.*) предложена на основе использования теории размерностей, причем общий расход наносов зависит от средней и динамической скоростей потока, гидравлической крупности и среднего размера частиц d_{50} , м [11, с. 84]:

$$G = Bk \left[\frac{v}{\sqrt{g(\rho_{\text{грунта}} / \rho_{\text{воды}} - 1)d_{50}}} \right]^{2,97} \left(\frac{u^*}{w} \right)^{1,47} \sqrt{g(\rho_{\text{грунта}} / \rho_{\text{воды}} - 1)d_{50}^3}, \quad (3)$$

где k — коэффициент пропорциональности, равный 0,00139; d_{50} — средний диаметр частиц, м.

Формула Янга (*Yang C.T.*) выведена в предположении о том, что основным фактором, определяющим содержание наносов в аллювиальных руслах, является удельная мощность потока, которая может быть рассчитана как диссипация потенциальной энергии за единицу времени на единицу веса воды [14, с. 130]. Отношение между удельной силой потока и общей концентрацией наносов C_t имеет вид:

$$\begin{aligned} \log C_t &= I_1 + J \log \frac{vI}{w}, \\ J &= 1,780 - 0,360 \log \frac{wd_{50}}{v} - 0,480 \log \frac{u^*}{w}, \\ I_1 &= 5,165 - 0,153 \log \frac{wd_{50}}{v} - 0,297 \log \frac{u^*}{w}, \end{aligned} \quad (4)$$

где w — гидравлическая крупность частиц, м/с; vI/w — безразмерная удельная мощность потока; I — уклон дна, б/р; v — кинематическая вязкость, м²/с; I_1 и J — параметры, определяемые множественным регрессионным анализом по данным наблюдений.

Формула Энгелунда (*Engelund F.*) и Хансена (*Hansen E.*), полученная в середине прошлого века, имеет вид [10, с. 124]:

$$G = \rho_{\text{грунта}} B \frac{0,05|v|^5}{\left(\frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{воды}}} - 1\right) \sqrt{gd_{50}C^3}}, \quad (5)$$

где C — коэффициент Шези, м^{0,5}/с. Представленная формула имеет относительно несложную запись и нередко используется отечественными специалистами в математических моделях речного потока.

Формула Молинаса (*Molinas A.*) и Ву (*Wu B.*) [12, с. 138] основана на уравнении Дарси-Веербаха, решаемого совместно с выражением для силы трения. Результатом является следующее отношение между общей концентрации наносов и результирующей силой потока ψ , б/р:

$$\begin{aligned} C_t &= \frac{1430(0,86 + \sqrt{\psi})\psi^{1,5}}{0,016 + \psi}, \\ \psi &= \frac{v^3}{\left(\frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{воды}}} - 1\right) ghw \left[\log \frac{h}{d_{50}}\right]^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Формула Р. Бэгнольда [13, с. 73] представляет собой полуэмпирическую зависимость вида

$$G = \frac{|v|^3}{C^2} \left(0,24 + 0,01 \frac{u^* C}{wg^{1/2}} \right) \rho_{\text{воды}}, \quad (7)$$

где τ — касательное напряжение на дне, кг/(м·с²).

Формула Карасева И.Ф. основана на двух зависимостях для расхода взвешенных и влекомых наносов [3, с. 156]:

$$G = 0,755 Q B v h s_{\text{взм}} \left[\frac{v \sqrt{g}}{0,755 v \sqrt{g} + 0,5 w C} B \varepsilon + \frac{39,5 d (v - v_n)}{v h} \right],$$

$$s_{\text{взм}} = 0,0002 \eta \frac{\rho_{\text{воды}}}{(\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}})} \frac{C^2 v^2}{g^2 h},$$

$$v_n = 1,15 \sqrt{g} (h d)^{0,25}, \quad \eta = 1,08 - 0,58 \left(\frac{v_c}{v} \right)^2, \quad v_c = 1,43 v_n,$$

$$B = \frac{w C + 0,7 v \sqrt{g}}{12 w C} \left(1 - e^{-\frac{12 w C}{w C + 0,7 v \sqrt{g}}} \right), \quad \varepsilon = 1 - 0,18 \frac{w C}{v \sqrt{g}}, \quad (8)$$

где Q — расход воды, м³/с; $s_{\text{взм}}$ — мутность взмыва; v_n — неразмывающая скорость, м/с; v_c — критическая скорость, м/с; η — вероятность срыва; ε — отношение наносонесущей части пульсаций к их общей совокупности; B — отношение средней по вертикали мутности к донной.

Формула Гончарова В.Н. для общего расхода наносов имеет вид (для условия $u^*/w < 2,5$) [2, с. 252]:

$$G = \rho_{\text{грунта}} \frac{1 + \varphi}{800} \frac{d}{h} \frac{v_n}{v} \left(\frac{v^3}{v_n^3} - 1 \right) \left(\frac{v}{v_n} - 1 \right) Q,$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}}{0,9 \rho_{\text{воды}}}} \frac{g d}{w^2},$$

$$v_n = 0,96 \sqrt{g d^{0,4} (d + 0,0014)^{0,6}} \left(\frac{h}{d} \right)^{0,2}, \quad (9)$$

где v_n — неразмывающая скорость потока, м/с.

Аналитическая формула расхода наносов является следствием основного уравнения движения воды и твердого вещества в открытом русле, представляющем собой баланс сил, действующих в системе «водный поток — донные отложения — наносы» [7, с. 39; 8, с. 72]:

$$G = \frac{\rho_{\text{грунта}}}{\rho_{\text{грунта}} - \rho_{\text{воды}}} Q \left[\frac{c}{h g} - (1 - f) \rho_{\text{воды}} I \right], \quad (10)$$

где c — сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²); f — коэффициент внутреннего трения, б/р; I — уклон русла, б/р.

В приведенных выше формулах динамическая скорость рассчитывается как отношение касательного напряжения на границе к плотности воды

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_{\text{воды}}}}. \quad (11)$$

Касательные напряжения на дне в соответствии с квадратичным законом сопротивления записываются в виде

$$\tau = -\lambda |v|v, \quad \lambda = gn^2 h^{-\frac{1}{3}}, \quad (11)$$

где λ — гидравлическое сопротивление на дне реки; n — коэффициент шероховатости русла.

Коэффициент Шези вычисляется по формуле Маннинга

$$C = \frac{1}{n} h^{\frac{1}{6}}. \quad (12)$$

Расчет по приведенным выше формулам проводился для периода средней водности. Диапазон основных гидравлических характеристик расчетных рек, в пределах которых проводились расчеты, приведен в табл. 2.

Из всех приведенных выше формул для расчета были использованы аналитическая формула расхода наносов (10), формулы Карима и Кеннеди (3), Янга (4), Энгелунда и Хансена (5), Молинаса и Ву (6), Р. Бэгнольда (7), Карасева (8) и Гончарова (9). Для прочих формул данные натурных наблюдений представлены в недостаточном объеме, что затрудняет оценку некоторых параметров.

В табл. 3 приводятся средние относительные отклонения между рассчитанными и наблюдаемыми расходами наносов. Средние относительные отклонения вычислялись по формуле

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|G_{\text{рас}} - G_{\text{изм}}|}{\min(G_{\text{изм}}; G_{\text{рас}})} 100\%. \quad (13)$$

Выбор минимального из рассчитанного и наблюдаемого значений расхода наносов в знаменателе формулы (13) дает возможность уйти от занижения среднего относительного отклонения в случае, когда рассчитанное значение близко к нулю. В этом случае среднее относительное отклонение, рассчитанное традиционным способом, стремится к 100 %, что занижает ошибку расчета.

Среднее относительное отклонение по всем исследуемым водотокам (табл. 3) составило от 55 (аналитическая формула расхода наносов) до 72 % (формула Энгелунда-Хансена). Формулы Янга (4), Молинаса и Ву (6), Карасева (8) и Гончарова (9) показали неудовлетворительные результаты (превышение над наблюдаемыми расходами наносов составило более 1000 %, также имели место отрицательные значения), поэтому данные о расчетах по этим формулам в табл. 3 не приводятся.

Таблица 2

Основные гидравлические характеристики расчетных рек

№	Гидрометрический створ	Уклон, б/р	Расход воды, м ³ /с	Скорость, м/с	Глубина, м	Ширина, м	G _н , кг/с	G _м , кг/с	G _{общ} , кг/с
1	Susitna River near Talkeetna, Alaska	0,00146	612–1160	1,8–2,7	1,7–2,3	183–202	197–849	2,26–10,4	199–859
2	Chulitna River below Canyon near Talkeetna, Alaska	0,00131	564–946	2,0–2,5	2,5–3,1	108–123	462–1690	26,9–145	488–1835
3	Tanana River at Fairbanks, Alaska	0,000467	1010–2020	1,3–1,9	2–2,9	296–469	2410–10030	16,3–89,4	2426–10119
4	Snake River near Anatone, Washington	0,001033	1990–3770	2,4–3,3	4,7–5,8	181–197	61,6–1270	1,07–58,7	62,67–1328
5	Toutle River at Tower Road near Silver Lake, Washington	0,00311	112–248	1,5–3,1	0,77–1,5	61–70	538–5820	33–232	682–5901
6	Fork Toutle River near Kid Valley, Washington	0,0037	110–185	2,4–2,8	0,85–1,1	56–59	1590–4980	110–338	1883–5090
7	Clearwater river at Spalding, Idaho	0,000312	847–1810	1,4–2,5	4,3–5,1	135–143	15,8–124	0,578–6,54	16,38–130,54
8	Yampa River at Deerloge Park, Colorado	0,000673	108–447	0,81–1,3	1,5–3,9	90–93	113–998	3,6–13,2	122,3–1008
9	Wisconsin River at Muscoda, Wisconsin	0,000311	114–714	0,49–0,88	0,71–2,6	278–310	1,42–20	1,76–23,3	3,18–43,3
10	Black River near Galesville, Wisconsin	0,000221	20,1–80,7	0,44–0,54	0,55–1,4	72–122	0,422–5,5	1,28–4,09	1,702–9,59
11	Chippewa River at Durand, Wisconsin	0,000326	132–884	0,77–1,1	1,3–3,2	215–244	2,78–64,5	5,52–23,3	8,3–87,8
12	Chippewa River near Pepin, Wisconsin	0,000309	118–391	0,57–0,86	10,76–1,8	229–274	2,24–45,7	2,89–14,7	5,13–60,4
13	North Fork of Lick Creek near Yellow Pine, Idaho	0,00666	1,28–4,25	0,52–0,95	0,32–0,51	7,3–8,8	0,00294–0,0978	0,0005–0,0292	0,00344–0,127
14	South Fork of Salmon River near Cascade, Idaho	0,00695	22–77,5	0,62–1,3	1,1–1,7	31,5–34,5	0,132–4,11	0,00632–6,42	0,138–10,53
15	Chippewa River near Caryville, Wisconsin	0,000213	117–779	0,45–1,1	1,4–2,8	185–247	0,936–16,4	0–13,5	0,936–29,9

Таблица 3

**Средние относительные отклонения между наблюдаемыми
и рассчитанными по разным формулам расходами наносов, %**

№	Гидрометрический створ	Аналит. ф-ла (10)	Карим и Кеннеди (3)	Энгелунд- Хансен (5)	Бэгнольд (7)
1	Susitna River near Talkeetna, Alaska	34	40	43	40
2	Chulitna River below Canyon near Talkeetna, Alaska	25	33	35	33
3	Tanana River at Fairbanks, Alaska	28	33	36	37
4	Snake River near Anatone, Washington	85	57	57	60
5	Toutle River at Tower Road near Silver Lake, Washington	38	247	307	144
6	Fork Toutle River near Kid Valley, Washington	36	19	21	25
7	Clearwater river at Spalding, Idaho	52	79	92	53
8	Yampa River at Deerloge Park, Colorado	60	79	82	70
9	Wisconsin River at Muscods, Wisconsin	44	73	78	55
10	Black River near Galesville, Wisconsin	30	37	48	55
11	Chippewa River at Durand, Wisconsin	38	37	36	75
112	Chippewa River near Pepin, Wisconsin	45	96	110	83
13	North Fork of Lick Creek near Yellow Pine, Idaho	110	44	44	68
14	South Fork of Salmon River near Cascade, Idaho	130	43	44	83
15	Chippewa River near Caryville, Wisconsin	67	44	47	77
Среднее значение, %		55	64	72	64

На рис. 6 приведены зависимости рассчитанных по приведенным выше формулам и наблюдаемых расходов наносов по исследуемым водотокам. Как видно из графиков, значения наблюдаемых и рассчитанных по формулам расходов наносов лежат практически на биссектрисе. Малые значения расходов наносов лучше вычисляются по формулам Карима–Кеннеди (3) и Энгелунда (5). В то же время, наблюдаемые и рассчитанные по формуле Энгелунда расходы наносов имеют больший разброс и систематическое отклонение в сторону занижения рассчитанных расходов наносов для больших значений.

В целом, результаты расчета общего расхода наносов дают значительно меньшую ошибку, чем расчеты расходов донных и влекомых наносов. Это объясняется тем, что в приведенных выше формулах связь расхода наносов и гидравлических характеристик потока прописана в согласии с общими представлениями о физике процесса перемещения твердого вещества в речных потоках, основной движущей силой которого является сдвигающая проекция силы тяжести потока, которой противостоит сопротивление на твердой границе потока.

Значение параметра шероховатости, задействованное во многих формулах, для каждого водотока и для каждой формулы подбиралось отдельно путем оптимизации результата. Полученные для разных формул параметры шероховатости для одного и того же водотока могут различаться на несколько порядков. Это говорит о том, что физический смысл параметра далек от его первоначального назначения и, скорее всего, он выполняет функцию эмпирического коэффициента.

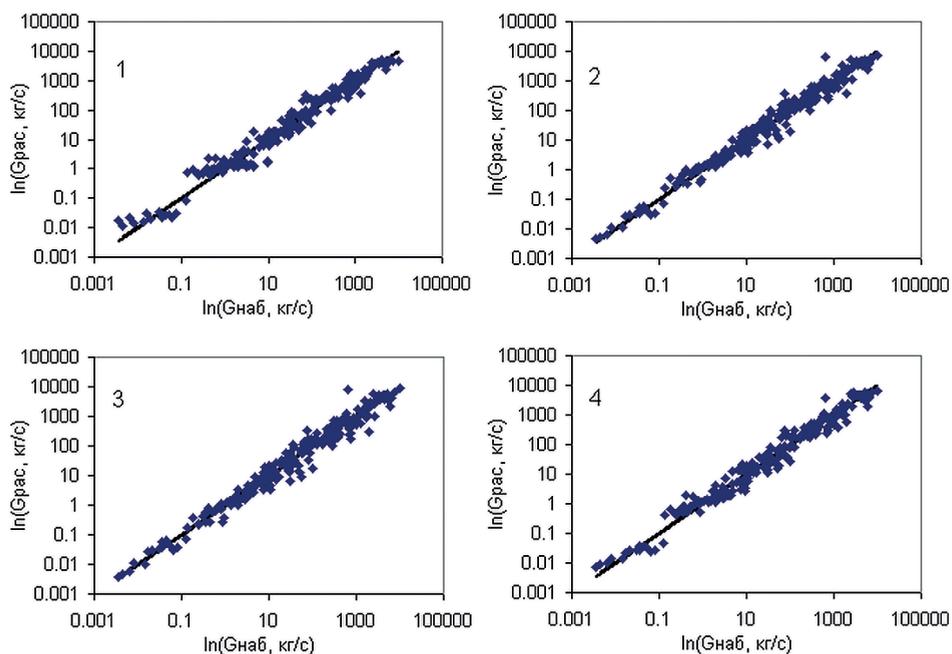


Рис. 6. Наблюденные и рассчитанные расходы наносов:
 1 — аналитическая формула (10); 2 — формулы Карима-Кеннеди (3);
 3 — Энгелунда-Хансена (5); 4 — Бэгнольда (7)

Значения параметров f и c в аналитической формуле расхода наносов также назначались подбором. Но, в отличие от параметра шероховатости, значение коэффициента внутреннего трения f характеризуется гораздо меньшей изменчивостью и в своем верхнем пределе близко к единице.

Анализ зависимости параметра сопротивления трения от водности в формулах общего расхода наносов

«Сопротивление трения представляет проекцию результирующей всех элементарных касательных сил, действующих вдоль смоченной поверхности на направление движения. Сопротивление трения является результатом действия сил вязкости воды, которые возникают в пограничном слое воды, примыкающем к твердой границе» [5, с. 101]. К параметрам сопротивления трения в гидравлических расчетах относят коэффициент Шези C (коэффициент сопротивления трения по длине), параметр шероховатости n , гидравлическое трение λ , а также сцепление частиц грунта при сдвиге c и коэффициент внутреннего трения f .

Основным фактором, определяющим значения перечисленных параметров в одном и том же замыкающем створе при неизменных характеристиках донных отложений, является водность потока. С одной стороны, в зависимости от фазы водности реки,

от степени наполненности русла, меняется и значение величины, характеризующей сопротивление. В период высокой водности площадь соприкосновения потока с руслом будет больше, чем в период межени. То есть можно ожидать, что общее сопротивление на твердой границе потока уменьшается с уменьшением смоченного периметра. С другой же стороны, сила гидродинамического давления потока на подстилающую поверхность в заданном замыкающем створе прямо пропорциональна водности потока. Например, сила трения $F_{\text{сопр}}$ может быть представлена по аналогии с известной в грунтоведении зависимостью сопротивления грунта сдвигу давлению со стороны потока [1, с. 172]: $F_{\text{сопр}} = Pf + cS$ где давление со стороны потока P представляет собой комплекс сил ($F_{\text{потока}}$), действующих в потоке на движущиеся и неподвижные частицы грунта; c — сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²); f — коэффициент внутреннего трения, б/р; S — площадь приложения силы, м². То есть с увеличением массы движущегося потока возрастает и касательное напряжение на его твердой границе.

Таким образом, изменение касательного напряжения на твердой границе потока и смоченного периметра в зависимости от водности потока должно отразиться на параметре, характеризующем трение в соответствующих гидравлических формулах и моделях. В то же время многие исследователи ставят значение гидравлического сопротивления в зависимость от режима движения потока — установившееся и неустановившееся движение [3, с. 81]. «...Гидравлические сопротивления зависят не только от наполнения русла и шероховатости, но и от предыстории движения» [4, с. 37].

На примере нескольких формул общего расхода наносов проанализируем связь параметра трения сопротивления с водностью речного потока. Для анализа были выбраны четыре формулы общего расхода наносов, показавшие наилучшие результаты в приведенных выше расчетах — формулы Карима-Кеннеди (3), Энгелунда-Хансена (5), Бэгнольда (7) и аналитическая формула расхода наносов (10),

Расчеты проводились для двух периодов водности — межени и периода средней и большой воды. Следует заметить, что для периода средней водности и периода большой воды совместно оптимизированные параметры трения показали одинаково хороший результат. Значения параметров сопротивления для каждой формулы подбирались отдельно для каждого водотока путем минимизации среднего относительного отклонения.

Для периода большой и средней водности лучший результат показали формулы Карима-Кеннеди (3), Энгелунда-Хансена (5) и аналитическая формула расхода наносов (10). Среднее относительное отклонение между рассчитанным и наблюдаемыми значениями общего расхода наносов по этим формулам составило около 60 %. Для периода межени наименьшее среднее относительное отклонение между рассчитанными и наблюдаемыми значениями показала аналитическая формула расхода наносов (10) — 75 %.

В табл. 4 приведены параметры сопротивления трения для каждой формулы и их соответствие увеличению (↑)/уменьшению (↓) расхода наносов. Это соответствие приводится для одного и того же поперечного сечения потока (неизменная морфометрия) при постоянных средних значениях скорости и глубины потока. Из таблицы следует, что чем больше параметр трения, тем больше расход наносов. Эта связь, безусловно, является опосредованной, и в ее истоке лежат зависимости трения от водности потока и расхода наносов от водности потока — с увеличением водности потока увеличивается как параметр трения, так и расход наносов.

Параметры сопротивления трения и их соответствие увеличению/уменьшению расхода наносов при $v = \text{const}$, $h = \text{const}$, $Q = \text{const}$, $I = \text{const}$

Формула расхода наносов	Показатель трения	Гидравлическое трение λ , касательное напряжение τ , коэффициент Шези C	Соответствие
Карим-Кеннеди (3)	n	λ, τ	$n \uparrow, \lambda \uparrow, \tau \uparrow, G \uparrow$
Энгелунд-Хансен (5)	n	C	$n \uparrow, C \downarrow, G \uparrow$
Бэгнольд (7)	n	τ, C	$n \uparrow, \tau \uparrow, C \downarrow, G \uparrow$
Аналитическая формула (10)	f, c	–	$f \uparrow, G \uparrow, c \uparrow, G \uparrow$

В табл. 5 приведены значения параметров сопротивления трения по расчетным формулам для малой и средней водности и меженного периода. Жирным цветом в таблице выделены значения, имеющие обратную связь — увеличение параметра трения с уменьшением водности.

Устойчивую зависимость параметра сопротивления трения от водности показала аналитическая формула расхода наносов (10). В 100 % случаев коэффициент внутреннего трения для периода межени меньше, чем для периода большой и средней водности. Для формулы Бэгнольда (7) такая зависимость выявлена для 12 из 14 водотоков (≈ 86 % случаев). Для формул Карима-Кеннеди (3) и Энгелунда-Хансена (5) лишь в половине случаев параметр шероховатости уменьшается с уменьшением водности. Это объясняется тем, что как коэффициент сопротивления трения C (коэффициент Шези), так и коэффициент гидравлического сопротивления λ , также являются гидравлическими переменными состояния потока, и их значения в значительной степени определяет средняя глубина потока. Также следует заметить, что значения параметра шероховатости в формулах (3), (5) и (7) отличаются на несколько порядков в зависимости от формулы. Сказанное может свидетельствовать о том, что параметры сопротивления в этих формулах не имеют устойчивого физического смысла.

Таким образом, параметр сопротивления (коэффициент внутреннего трения) в аналитической формуле расхода наносов является вполне обоснованной физически величиной, а в формулах (3) и (5) параметры трения (коэффициенты шероховатости) выполняют роль эмпирических коэффициентов.

Выводы

В результате проведенных в данной работе обобщений и расчетов были сделаны следующие выводы:

1. Полученная зависимость вклада влекомой составляющей в общий расход наносов от фазы водности водотока в целом соответствует общим представлениям об основных физических закономерностях процесса транспорта наносов речным потоком.
2. На основании данных наблюдений на пятнадцати североамериканских водотоках рассчитан общий расход наносов по нескольким известным формулам. Сопоставление наблюдаемых и рассчитанных расходов наносов показало, что наименьшее

Таблица 5

**Значения параметров сопротивления трения по расчетным формулам
для малой и средней водности и меженного периода**

Гидрометрический створ	f		n		n		n	
	ср. водность	мин	ср. водность	мин	ср. водность	мин	ср. водность	мин
Susitna River near Talkeetna, Alaska	1,19	1,05	50	26	0,0062	0,0054	0,4	0,2
Chulitua River below Canyon near Talkeetna, Alaska	1,64	1,5	130	110	0,65	0,63	0,64	0,46
Tanana River at Fairbanks, Alaska	4,3	1,8	360	170	1,1	0,75	2	0,85
Snake River near Anatone, Washington	1,05	1,02	22	17	0,28	0,25	0,26	0,15
Toutle River at Tower Road near Silver Lake, Washington	3	1,5	440	330	1,2	1,1	0,75	0,37
Fork Toutle River near Kid Valley, Washington	3,55	1,2	470	180	1,15	0,8	0,75	0,15
Clearwater river at Spalding, Idaho	1,075	1,07	22	46	0,0036	0,0071	0,22	0,22
Yampa River at Deertogte Park, Colorado	2,45	2	500	510	1,4	1,45	1	0,6
Wisconsin River at Muscods, Wisconsin	1,054	1,04	90	170	0,74	0,85	0,45	0,45
Chippewa River at Durand, Wisconsin	1,14	1,06	110	70	0,7	0,6	0,4	0,2
Chippewa River near Pepin, Wisconsin	1,17	1,1	150	185	0,85	0,95	0,5	0,35
North Fork of Lick Creek near Yellow Pine, Idaho	1,001	1,00035	12	65	0,21	0,57	0,013	0,015
South Fork of Salmon River near Cascade, Idaho	1,02	1,004	48	90	0,45	0,75	0,09	0,06
Chippewa River near Caryville, Wisconsin	1,042	1,03	62	240	0,5	1,2	0,22	0,23

отклонение дает аналитическая формула расхода наносов, которая обеспечена стандартными гидрометрическими данными наблюдений и имеет относительно простую структуру (по сравнению с другими формулами общего расхода наносов).

3. Показано, что практически для всех расчетных створов параметры гидравлического сопротивления зависят от периода водности. Однако устойчивый результат этой зависимости (уменьшение параметра сопротивления с уменьшением водности) показали лишь формула Бэгнольда и аналитическая формула расхода наносов.

Литература

1. *Бабков В.Ф., Быковский Н.И., Гербурт-Гейбович А.В., Тулаев А.Я.* Грунтоведение и механика грунтов. — М.: Дориздат, 1950. — 334 с.
2. *Гончаров В.Н.* Динамика русловых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1962. — 366 с.
3. *Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 288 с.
4. *Карасев И.Ф., Коваленко В.В.* Стохастические методы речной гидравлики и гидрометрии. — Л.: Гидрометеиздат, 1992. — 208 с.
5. *Корпачев В.П.* Теоретические основы водного транспорта леса. — М.: Академия естествознания, 2009. — 237 с.
6. *Лопатин Г.В.* Наносы рек СССР. — М.: Географгиз, 1952. — 363 с.
7. *Шмакова М.В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. — СПб.: Лема, 2013. — 142 с.
8. *Шмакова М.В.* Расчет заносимости русловых карьеров // Учёные записки РГГМУ, 2012, № 26, с. 71–75.
9. *Ackers P., White W.R.* Sediment transport: new approach and analysis // Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 1973, vol. 99, no. NY11, pp. 2041–2060.
10. *Engelund F., Hansen E.* A monograph on Sediment transport In Alluvial Streams // Nordic Hydrology, 1967, no. 7.
11. *Karim M.F., Kennedy J.F.* Computer-based predictors for sediment discharge and friction factor of alluvial streams // Iowa Institute of Hydraulic Research, University of Iowa, 1983, Report No. 242.
12. *Molinas A., Wu B.* Transport of sediment in large sand-bed rivers // Journal of Hydraulic Research, 2001, vol. 39, no. 2, pp. 135–145.
13. *Visser P.J.* Application of sediment transport Formulae to sand-dike breach Erosion // Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 94-3, Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, 1995.
14. *Yang C.T.* Unit stream power equation for total load // Journal of Hydrology, 1979, vol. 40, no. 1, pp. 123–138.
15. *Yang S.Q., Lim S.Y.* Total load transport formula for flow in alluvial channels // Journal of Hydraulic Engineering, 2003, vol. 129, no. 1, pp. 68–72.
16. URL: <http://pubs.usgs.gov/of/1989/0067/report.pdf>